

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Базовая кафедра фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ

Зав. баз. кафедрой ФилТ

А.Н. Втюрин

« _____ » _____ 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Мониторинг содержания компонентов на различных стадиях добычи и
переработки руд (S, Ni, Cu, Fe)

16.04.01 «Техническая физика»

16.04.01.02 «Оптическая физика и квантовая электроника»

Научный руководитель	_____	профессор, д-р физ.-мат.наук	Е.А. Слюсарева
Выпускник	_____		Ю.А. Шереметьева
Рецензент	_____	профессор, д-р физ.-мат.наук	В.В. Салмин

Красноярск 2018

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Мониторинг содержания компонентов на различных стадиях добычи и переработки руд (S, Ni, Cu, Fe)» содержит 37 страниц текстового документа, 8 иллюстраций, 3 таблицы, 4 формулы, 1 приложение, 13 использованных источника.

РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, ПРОБОПОДГОТОВКА, РУДА, НОРИЛЬСКИЙ НИКЕЛЬ, МЕТОД ВИЛКОКСОНА.

Цель: исследование возможности использования руды, не прошедшей измельчение, для мониторинга содержания компонентов серы, никеля, меди и железа на различных стадиях добычи и переработки руд методом рентгеноспектрального анализа.

В ходе работы был проведен сбор данных о процентном содержании серы, никеля, меди и железа в руде, добытой на ЗФ ПАО «ГМК “Норильский никель”» методом РСА. Перед использованием Т-критерия Вилкоксона для выполнения цели магистерской диссертации были проведены классификация и обобщение полученных данных для трех видов пробоподготовки руды; а также корреляционный анализ и определение вида распределения путем построения гистограмм для содержания компонентов в пробах.

Проведенное статистическое исследование показало, что экспресс анализ неизмельченной руды непосредственно в транспортной системе не может полностью заменить более точный анализ, требующий длительную пробоподготовку. Но он подходит для первичных результатов о концентрации компонентов.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Обзор литературы	6
1.1 Разработка динамической системы управления и контроля качества добычи и переработки минерального сырья	6
1.2 Теоретические основы рентгенофлуоресцентного метода анализа	7
1.3 Качественный спектральный анализ.....	12
1.4 Количественный спектральный анализ	13
1.5 Особенности распределения элементов в руде.....	15
1.6 Обоснование выбора статистического метода.....	17
2 Материалы и методы	21
3 Результаты и их обсуждения.....	23
3.1 Корреляционный анализ данных.....	23
3.2 Определение вида распределения данных	25
3.3 Анализ данных методом Вилкоксона	28
3.4 Обсуждения результатов.....	29
Заключение	31
Список использованных источников	32
Приложение	34

ВВЕДЕНИЕ

Горно-металлургическая компания «Норильский никель» — одна из крупнейших в мире компаний по производству цветных и драгоценных металлов. Из норильских руд производят медь, никель, кобальт, золото, серебро, платину, иридий, селен, палладий, родий, рутений, осмий, серу, теллур. На Таймырском полуострове находятся значительные запасы каменного угля и природного газа, железо и ртуть, поваренная соль и графит, гипс и мрамор, известняк и алевролиты, ангидрит и кварцевый песок. Основная технологическая цепочка Заполярного филиала включает горнодобывающие, обогатительные, металлургические и транспортные предприятия.

Приоритетной задачей компании является поддержание качества продукции, соответствующего международным стандартам. Первым основным звеном комплекса управления качеством добытой руды является геолого-маркшейдерское обеспечение, представляющее систему получения и обработки информации о качестве руд с целью его поддержания на определенном уровне в процессе добычи. Сложность системы определяется организацией получения данных, периодичностью и трудоемкостью решения задач, объемами перерабатываемой информации. Это, в свою очередь, связано с изменчивостью уровня и стабильности качественных характеристик, качеством технологического процесса, схемой формирования качества.

Создание динамической технологии управления и контроля качества добычи и переработки минерального сырья на основе моделирования месторождений и управления рудопотоками актуально для крупных горно-металлургических комбинатов, где на перерабатывающее производство поступает руда с нескольких рудников и встает проблема увязки всех звеньев технологического процесса от геологической модели месторождения, очистных забоев, рудных складов, транспортной системы до обогатительной фабрики и металлургического завода. Для ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»» создание эффективной технологии управления рудопотоками особо важно, так как на его

месторождениях ведется добыча и переработка многокомпонентных руд и существует необходимость выдерживать плановые показатели по целому ряду металлов.

Целью магистерской диссертации является исследовать возможность использования руды, не прошедшей измельчение, для мониторинга содержания компонентов серы, никеля, меди и железа на различных стадиях добычи и переработки руд методом рентгеноспектрального анализа.

Основные задачи:

- сбор данных о процентном содержании серы, никеля, меди и железа в руде, добытой на ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»»;

- классификация и обобщение полученных данных для трех видов пробоподготовки руды;

- проверка статистической гипотезы о неразличимости полученных данных содержания серы, никеля, меди и железа в пробах при разных видах пробоподготовки с использованием Т-критерия Вилкоксона.

- формулировка вывода о возможности использования руды, не прошедшей измельчение, для мониторинга содержания компонентов серы, никеля, меди и железа на различных стадиях добычи и переработки руд методом рентгеноспектрального анализа.

1 Обзор литературы

1.1 Разработка динамической системы управления и контроля качества добычи и переработки минерального сырья

Для «ГМК «Норильский никель»» создание эффективной технологии управления рудопотоками особо важно, так как на его месторождениях ведется добыча и переработка многокомпонентных руд и существует необходимость выдерживать плановые показатели по целому ряду металлов. Разработка интеллектуальной технологии мониторинга и управления качеством рудопотоков при добыче и переработке многокомпонентных руд предполагает решение следующих задач:

- создание цифровых геологических моделей месторождений, обеспечивающих основу для подготовки систем долгосрочного и оперативного планирования и контроля их разработки;

- разработку системы автоматизированного планирования горных работ и технологических решений, обеспечивающих заданные нормативы и показатели извлечения, а также количественные и качественные характеристики формируемых рудопотоков;

- разработку систем контроля качественных характеристик перемещаемой руды за счет применения технических средств оперативного измерения содержания компонентов, работающих в режиме постоянного мониторинга.

Учитывая сложность проблемы, в 2016 году руководством компании ПАО «ГМК «Норильский никель»» и ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» подписано соглашение о создании в СФУ научно-технологического центра «Лаборатории по разработке динамической системы управления и контроля качества добычи и переработки минерального сырья», цель которого – научно-методическое и кадровое обеспечение разработки и внедрения интеллектуальной технологии управления качеством рудопотоков при добыче и переработке руд ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»».

Анализ схемы рудопотоков предприятия показал, что для реализации

данной динамической системы управления качеством руды, кроме создания математической блочной модели рудного тела с точной проекцией на него существующего состояния горных работ, включая отработанные участки, потребуется расширение системы оперативного контроля качества рудных потоков для получения полной информации о всех возможных направлениях очистной выемки [2]. Для эффективного управления качеством руд потребуется пересмотр и совершенствование технологии горных работ, автоматизированная выработка управляющих решений и создание системы аккумулирующих емкостей, включая приемные бункера околоствольных дворов, усреднительные склады и т. д. с известным качеством, позволяющие гибко реагировать на изменяющиеся условия и своевременно регулировать параметры составляющих элементов рудопотоков для обеспечения требуемых качественных характеристик.

Важнейшим звеном динамической системы управления качеством руды является предлагаемая технология инструментального контроля показателей качества непосредственно в транспортной системе на конвейерах, которая позволяет оперативно в режиме реального времени оценивать баланс полезных компонентов в системе рудник – обогатительная фабрика. В такой системе будет производиться анализ руды, не прошедшей специальной пробоподготовки, которая необходима для определения химического состава продукции в лабораторных условиях. Соответственно, в таком случае сократятся время- и трудозатраты на получение данных о составе руды. Оптимальным способом анализа руды является рентгенофлуоресцентный метод.

1.2 Теоретические основы рентгенофлуоресцентного метода анализа

Рентгенофлуоресцентная спектрометрия (РФСА) – один из современных спектроскопических методов исследования вещества с целью получения его элементного состава. Диапазон определяемых элементов и границы их

обнаружения в РФСА зависят от используемой аппаратуры. В общем случае, в область определяемых элементов входят от В до U включительно. Данный метод обладает широким диапазоном определяемых содержаний: от 10^{-4} до 100 мас. %.

Метод РФСА основан на сборе и последующем анализе спектра, полученного путём воздействия на образец высокоэнергетическим рентгеновским излучением. Часть излучения проходит через образец, часть рассеивается, и часть поглощается веществом образца. Поглощение рентгеновского излучения веществом приводит к проявлению сразу нескольких эффектов, одним из которых является рентгеновская флуоресценция – испускание веществом вторичного рентгеновского излучения. При рентгеновской флуоресценции атомы одного химического элемента излучают фотоны со строго определенной энергией, которая фактически не зависит от химического строения вещества.

Рентгеновскую флуоресценцию можно рассмотреть как процесс, происходящий в три стадии (Рисунок 1):

- рентгеновский фотон с высокой энергией «выбивает» из атома электрон с одной из его внутренних электронных оболочек;
- возникает нестабильное высокоэнергетическое состояние атома с электронной вакансией;
- вакансию занимает электрон с одной из внешних электронных оболочек; избыточная энергия выделяется в виде кванта рентгеновской флуоресценции.

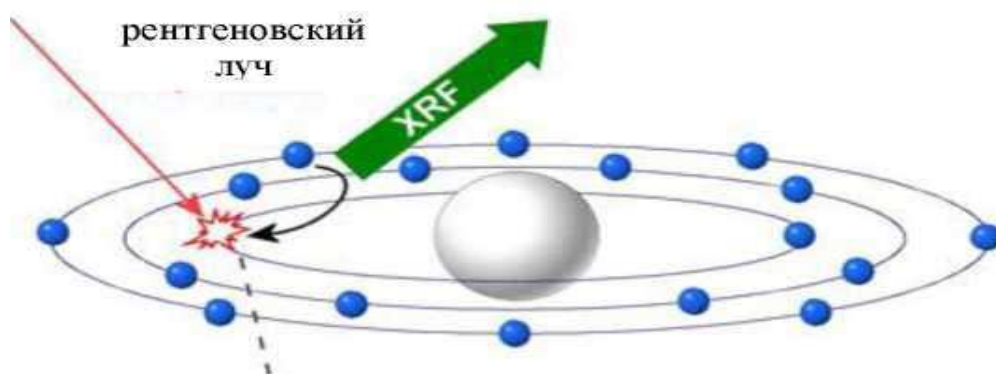


Рисунок 1 – Схема процесса возникновения рентгенофлуоресцентного излучения

Модель атома Бора описывает строение атома в виде атомного ядра, окруженного электронными оболочками (Рисунок 2). Положительно заряженное ядро окружено электронами, которые вращаются в определенных областях пространства (оболочках).

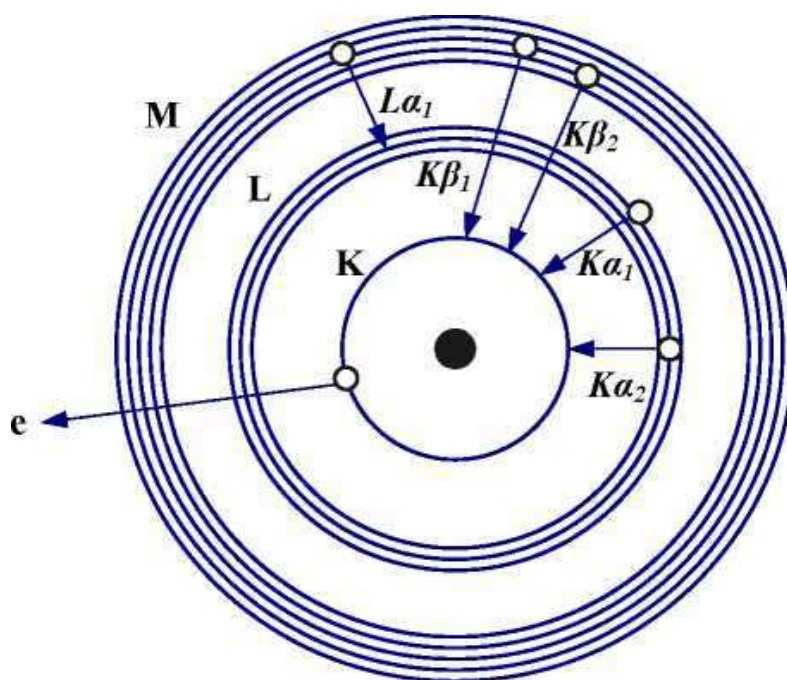


Рисунок 2 – Модель атома Бора, модель электронных оболочек

Связь электронов в атоме тем слабее, чем дальше они удалены от атомного ядра. Минимальная энергия, необходимая для удаления электрона из атома, и энергия, с которой электрон связан с атомом, называется энергией связи электрона в атоме.

Энергия связи электрона в атоме устанавливается в результате определения поглощенной энергии, при которой происходит процесс поглощения атомом излучения. Отдельные оболочки обозначаются буквами K , L , M , N , и т.д. (Рисунок 2), причем самая внутренняя оболочка называется K – оболочкой, следующая за ней L – оболочкой и т.д. K – оболочка занята 2 электронами, L – оболочка имеет три подуровня и может в совокупности

содержать до 8 электронов. M – оболочка имеет пять подуровней и может содержать до 18 электронов.

Длина волны испускаемого фотона связана с энергией формулой $E = E_1 - E_2 = hc/\lambda$, где E_1 и E_2 – энергии орбиталей, между которыми произошел переход электрона, h – постоянная Планка, c – скорость света, λ – длина волны испускаемого (вторичного) фотона [12]. Таким образом, длина волны является индивидуальной характеристикой каждого элемента и называется характеристической флуоресценцией. В то же время интенсивность (число фотонов, поступающих за единицу времени) пропорциональна концентрации (количеству атомов) соответствующего элемента. Это дает возможность элементного анализа вещества: определение количества атомов каждого элемента, входящего в состав образца.

Рентгеновское излучение – это электромагнитное излучение с длиной волны, лежащей в диапазоне длин волн от 0,01 до 100 нм.

Источником возбуждающего (первичного) излучения высокой энергии является рентгеновская трубка, питаемая высокостабильным генератором высокого напряжения (Рисунок 3). Спектральный состав излучения трубки зависит от выбора материала анода. Для большинства областей применения оптимальным является родиевый анод, хотя другие материалы, например молибден, хром или золото, могут быть предпочтительнее в определенных случаях.

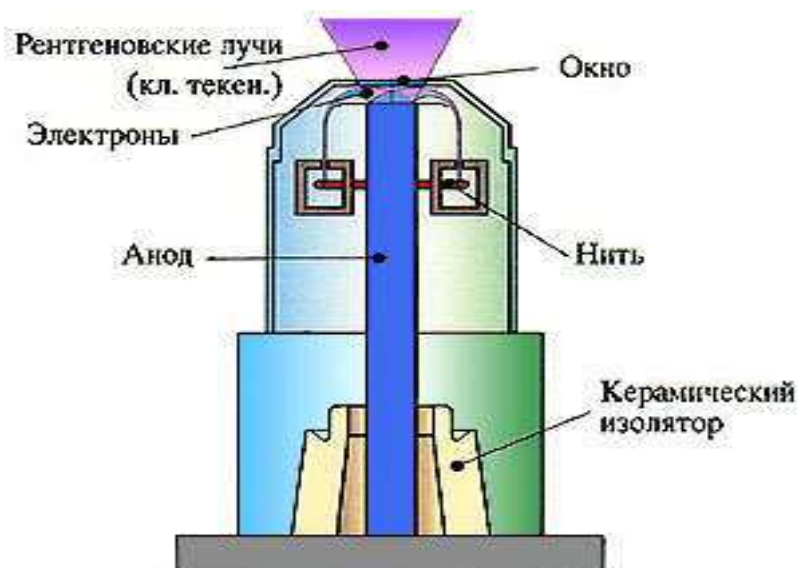


Рисунок 3 – Устройство рентгеновской трубки

Электромагнитное излучение может возникнуть всегда, когда электрически заряженные частицы, особенно электроны, в результате какого-либо изменения теряют кинетическую энергию. Это может произойти при торможении, изменении направления движения или переходе на более низкий энергетический уровень в электронной оболочке атома. В генерации рентгеновского излучения в диапазоне рентгеновской аналитики важную роль играют процессы торможения электронов и их переходы с некоторого энергетического уровня в электронной оболочке атома на более низкий уровень.

Чтобы вызвать рентгеновское излучение должен быть применен метод, при котором возможно удаление электронов с самых внутренних оболочек атома. К тому же внутренним электронам необходимо передать энергию большую, чем их энергия связи в атоме. Для этого существуют различные способы:

- облучение элементарными частицами достаточной энергии (электроны, протоны, α -частицы), которые при столкновении передают электронам оболочки энергию, необходимую для их удаления из атома;
- облучение рентгеновскими или гамма-лучами радионуклидов;

- облучение рентгеновскими лучами из рентгеновской трубки.

Применение рентгеновской трубки оказывается технически наиболее простым и наиболее безопасным с точки зрения защиты от радиации решением (рентгеновская трубка может быть выключена, а радионуклид нет).

Метод рентгенофлуоресцентного анализа позволяет проводить качественный и количественный анализ образцов.

1.3 Качественный спектральный анализ

Целью качественного анализа является определение наличия или отсутствия химических элементов в образце без каких-либо количественных оценок. Получение результата производится путем сканирования спектра по длинам волн (дискретно, с заданным шагом) с записью интенсивности излучения в каждый момент сканирования и с одновременным графическим отображением. В результате, на мониторе отображается рисунок снятого спектра в виде графика, где по одной оси отложена шкала длин волн (λ , м), а по другой – интенсивность излучения (I, имп./с). Как известно, у каждого элемента есть набор рентгеноспектральных линий, причем каждому элементу соответствует определенная длина волны. Таким образом, определив положение того или иного «максимума», можно сделать вывод о его происхождении. Полученный спектр подвергается расшифровке, т.е. выделению в спектре характеристических линий химических элементов.

Результатом расшифровки спектра является список линий химических элементов, которые программа «смогла» в нем обнаружить. Все найденные в спектре линии «подписываются» на изображении, при этом каждая «подпись» состоит из обозначения химического элемента и названия линии.

В качестве примера на Рисунке 4 приведен общий вид спектра вторичного излучения на примере образца меди.

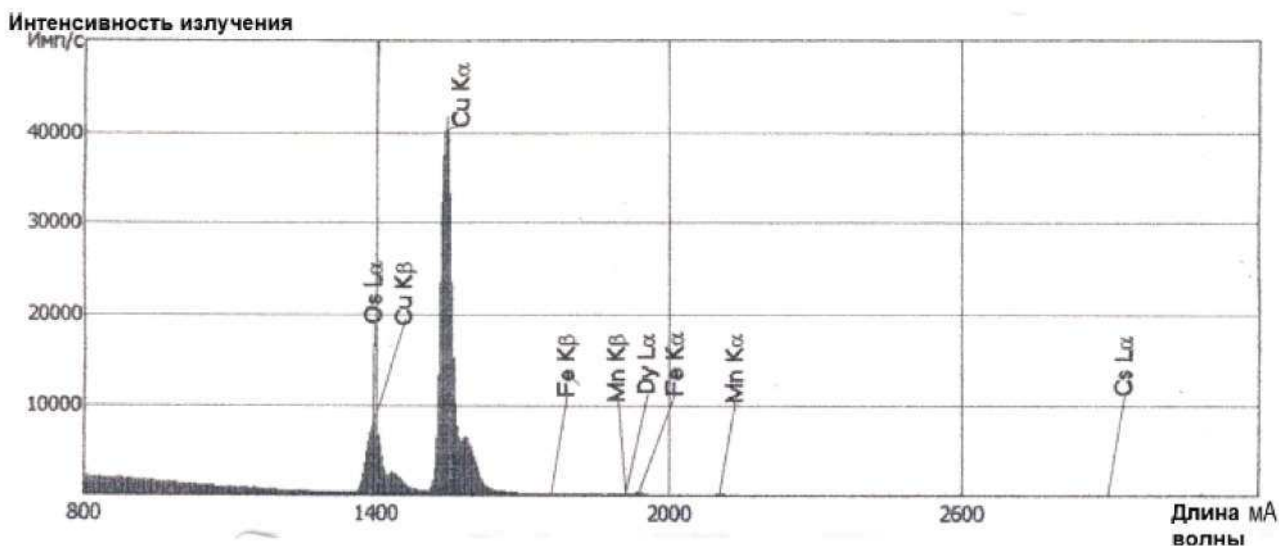


Рисунок 4 – Спектр образца меди с примесями

Довольно часто среди подписанных линий встречаются «ложные», то есть идентифицированные неправильно. Основными причинами появления «ложных линий» на спектре могут быть: флуктуации рассеянного тормозного излучения, линии когерентного и некогерентного рассеяния материала анода и просто погрешности прибора.

1.4 Количественный спектральный анализ

Количественный анализ предназначен для точной количественной оценки состава пробы. Все виды данного вида анализа основаны на существовании функциональной зависимости между измеренной интенсивностью аналитической линии и концентрацией соответствующего элемента в образце. Очевидно, что, чем выше концентрация данного элемента (чем больше атомов этого элемента в пробе), тем большее количество квантов, имеющих соответствующую энергию, излучится из пробы, то есть тем интенсивнее линия характеристического излучения. Если измерить несколько образцов с известной концентрацией, так называемых эталонных или градуировочных образцов, то можно для каждого анализируемого элемента найти указанную зависимость (градуировочная характеристика). Она

выражается, как в аналитическом (градуировочное уравнение), так и в графическом (градуировочный график) виде [12].

Градуировочное уравнение в общем виде записывается выражением

$$C_{(x)} = A_0 + A_1 \cdot I_{(x)}, \quad (1)$$

где A_0 – коэффициент, характеризующий величину фоновой «подстановки» под аналитической линией. При нулевой концентрации элемента x в пробе она не равна нулю;

A_1 – концентрационная чувствительность (определяется углом наклона калибровочного графика) показывает удельное изменение величины аналитического сигнала при изменении концентрации элемента в пробе;

$I_{(x)}$ – интенсивность аналитической линии.

На практике, в ряде случаев градуировочное уравнение не является линейным. Отклонение от линейности связано с фактором межэлементного влияния и эффекта матрицы. Межэлементное влияние обусловлено наличием в образце других элементов: y , z и др., изменяющих (увеличивающих или уменьшающих) интенсивность вторичного излучения определяемого элемента x . В случае поглощения вторичного излучения определяемого элемента материалом образца интенсивность излучения уменьшается. Степень снижения интенсивности аналитического сигнала при определении элемента x может быть разной в зависимости от компонентного состава примесей и их содержания в пробе. С увеличением атомного номера примесных ионов вероятность поглощения кванта определяемого иона возрастает. В случае, если энергия флуоресцентного кванта элемента примеси y превышает потенциал возбуждения определяемого элемента x и находится вблизи соответствующего края поглощения, то происходит процесс «подвозбуждения», то есть более активный квант примеси увеличивает квантовый выход определяемого элемента, не пропорционально его содержанию в образце.

Действие двух противоположно направленных процессов обуславливает

положительную или отрицательную ошибку нахождения содержания определяемого элемента. Взаимное влияние указанных процессов, происходящих при рентгенофлуоресцентном анализе, отражается на градуировочном уравнении, которое имеет вид

$$C(x) = A_0 + A_1 \cdot \bar{I}(x) + A_2 \cdot \bar{I}(y) \cdot I_{(x)}, \quad (2)$$

где $\bar{I}(x)$ – интенсивность аналитической линии, влияющей на квантовый выход элемента y .

Отсутствие линейности функции может быть откорректировано использованием вторичной градуировки эталонов для анализа элемента x , содержащих все элементы влияния на его определение в максимально возможном их сочетании при изменяющихся концентрациях. В этом случае калибровочный график анализа определяемого элемента будет адекватно отражать его концентрацию в пробах. Особенности образцов для РФА могут быть представлены различными поправками в уравнении с учетом приоритетных процессов.

1.5 Особенности распределения элементов в руде

При исследовании руды на процентное содержание компонентов в ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»» большое внимание уделяется 4-м элементам, о которых говорится в данной работе. Медь и никель являются основным поставляемым товаром горнодобывающей компании, так же важным элементом является железо, так как оно является сопутствующим металлом. Значительным показателем при добыче вышеперечисленных компонентов является содержание серы в руде, так как ее большое содержание отрицательно влияет на поставляемую продукцию. Сера вызывает снижение прочности стали при повышенных температурах (красноломкость), и поэтому во всех случаях является вредной примесью. Хотя основное количество серы в доменную печь

вносится с коксом, иногда ее много содержится и в руде. [1].

Большое влияние на вид градуировочного уравнения при количественном спектральном анализе оказывает распределение элементов в руде. Норильский район находится в западной части Енисейско-Оленекского рудного пояса, протягивающегося вдоль северной части Сибирской платформы. В Норильском рудном районе известны следующие сульфидные медно-никелевые месторождения, генетически и пространственно тесно связанные с дифференцированными интрузивами габбро-долеритов: Норильск I, Норильск II, гора Черная, Талнахское, Октябрьское, Имангда.

В сульфидных рудах никель присутствует главным образом в виде пентландида, представляющего изоморфную смесь сульфидов никеля и железа переменного соотношения, и частично в форме твердого раствора в пирротине. Основным спутником никеля в сульфидных рудах является медь, содержащаяся главным образом в халькопирите. Из-за высокого содержания меди эти руды называют медно-никелевыми. Кроме никеля и меди в них обязательно присутствуют кобальт, металлы платиновой группы, золото, серебро, селен и теллур, а также сера и железо. Таким образом, сульфидные медно-никелевые руды являются полиметаллическим сырьем очень сложного химического состава. При их металлургической переработке в настоящее время извлекают 14 ценных компонентов. Химический состав сульфидных медно-никелевых руд следующий, %: Ni – 0,3...5,5; Cu – 0,2...1,9; Co – 0,02...0,2; Fe – 30...40; S – 17...28; SiO₂ – 10...30; MgO – 1...10; Al₂O₃ – 5...8. По структуре медно-никелевые руды могут быть сплошными, жильными и вкрапленными. Чаще встречаются два последних типа руд. При этом в сульфидных рудах никель представлен главным образом изоморфной смесью сульфидов железа и никеля (Ni, Fe)S, медь находится в виде сернистых соединений (медный колчедан или халькопирит CuFeS₂, халькозин Cu₂S, ковелин CuS) а пустая порода состоит из силикатов железа и магния, пирротина и других соединений.

1.6 Обоснование выбора статистического метода

Для обоснования возможности использования руды, не прошедшей измельчение, для мониторинга содержания компонентов на различных стадиях добычи и переработки руд методом РСА используются статистические методы, полученные в ходе проведения РСА руды результаты представляют собой большой набор данных для каждого из 4 химических элементов S, Ni, Cu, Fe для каждой отдельной пробы. Статистика – это наука, в которой излагаются общие вопросы измерения анализа массовых статистических (количественных или качественных) данных. Статистика позволяет распространить выводы, полученные по огромному числу наблюдений (выборке), на весь объект (совокупность). Геологические исследования сводятся к выборочному изучению состава и свойств горных пород, минералов и полезных ископаемых, отобранных в отдельных участках земной коры. Каждое выборочное наблюдение относится к малому объему недр, а выводы, полученные по наблюдениям, распространяются на весь изучаемый объем [6].

Для обоснования существования закономерной связи между изучаемыми признаками используют корреляционный анализ. Корреляционное поле и корреляционная таблица являются вспомогательными средствами при анализе выборочных данных, по их виду можно составить предварительное мнение о форме зависимости случайных величин (например, о том, что одна величина в среднем возрастает или убывает при возрастании другой). Форма и ориентировка корреляционного поля точек позволяют судить о наличии и силе корреляционной связи, о ее прямом или обратном характере, линейном или нелинейном виде. Если связь между изучаемыми свойствами существует, то корреляционное поле точек имеет форму вытянутого эллипса, длинная ось которого наклонена относительно осей координат. Корреляционное поле точек позволяет также проверить однородность выборочной совокупности. Если на графике имеются точки, значительно удаленные от основного поля, это указывает на возможное засорение выборки аномальными значениями, не

характерными для данного объекта [6]. Так же при использовании метода корреляции рассчитывается уравнение связи и коэффициент корреляции (R), то есть статистический показатель зависимости двух случайных величин. R может принимать значения от -1 до $+1$. При этом значение -1 будет говорить об отсутствии корреляции между величинами, 0 - о нулевой корреляции, а $+1$ - о полной корреляции величин. Т.е., чем ближе значение коэффициента корреляции к $+1$, тем сильнее связь между двумя случайными величинами [4].

Следует напомнить, что руда – это природное тело с определённым химическим составом и кристаллической структурой, образующееся в результате природных физико-химических процессов, и функция плотности распределения относятся к генеральной совокупности. При выборочном изучении случайных величин вместо вероятности используется ее оценка и распределения отражаются графически в виде выборочных аналогов функций распределения случайной величины – диаграмм плотности распределения (полигонов и гистограмм). При построении эмпирических графиков функции плотности распределения $f_x(x)$ – полигонов или гистограмм, по оси ординат откладываются частоты, соответствующие каждому классу значений случайной величины. Частотные диаграммы позволяют высказать предварительное суждение о законе распределения случайной величины, о степени ее изменчивости и однородности выборок.

При выборе метода анализа данных стоит опираться на функциональный вид распределения. Достаточно часто применяется критерий Стьюдента для сравнения одной и двух несвязанных групп. Этот критерий основан на допущении, что изучаемый признак подчиняется нормальному (гауссовому) распределению и сравниваемые совокупности имеют равные дисперсии, то есть равные средние квадраты отклонений индивидуальных значений признака от их средней величины. Однако эти условия не всегда выполняются: в одних случаях слишком велика разница дисперсий, в других распределение признака отличается от нормального. Для анализа таких данных используют непараметрические методы.

Непараметрические методы – это методы, не требующие какого-либо определенного распределения данных, так как в них не используются параметры генеральной совокупности (например, среднее арифметическое и стандартное отклонение, как для критериев, требующих нормального распределения), а осуществляется ранжирование абсолютных значений, то есть определение порядка элементов по их значению [6]. Данный способ позволяет нивелировать эффект выскакивающих величин и скошенности распределения.

Примером непараметрического метода является двухвыборочный критерий Т-Вилкоксона. Это один из самых известных инструментов непараметрической статистики (наряду с критериями на основе статистик типа Колмогорова-Смирнова, омега-квадрат и коэффициентами ранговой корреляции). Свойствам этого критерия и таблицам его критических значений уделяется место во многих монографиях по математической и прикладной статистике. Метод основан на ранжировании абсолютных разностей пар значений зависимых выборок. Далее подсчитывается сумма рангов отрицательных и положительных разностей [5]. Вероятность отклонения гипотезы, когда она неверна, т.е. мощность критерия Вилкоксона как критерия проверки гипотезы, стремится к 1 при возрастании объемов выборок. Если же гипотеза верна, то статистика Т асимптотически нормальна с математическим ожиданием 0.

Алгоритм расчета Т-критерия Вилкоксона:

- необходимо определить разность значений для каждого испытуемого в первом и во втором замере;
- ранжировать абсолютные значения разностей;
- выписать ранги положительных и отрицательных значений разностей;
- посчитать суммы рангов отдельно для положительных и отрицательных разностей, за эмпирическое значение критерия принимается наименьшая сумма рангов, которая сравнивается с таблицей критических значений [7]

$$T_{\text{эмп}} = \sum R_{\text{редк. знака}}, \quad (3)$$

для больших выборок и выборок среднего размера применяется формула (4)

$$T_{\text{эмп}} = \frac{\Sigma R_{\text{редк. знака}} - \frac{n*(n+1)}{4}}{\sqrt{\frac{n*(n+1)*(2n+1)}{24}}}; \quad (4)$$

- определить Р (уровень значимости): $T_{\text{эмп}}$ (эмпирический коэффициент) сравнивается с табличным значением для соответствующего объема выборки.

После чего принимается статистическое решение и формулируется содержательный вывод.

2 Материалы и методы

Во время проведения исследования проб в R&D-центре ГМК «Норильский никель» был проведен анализ руды, отобранной на Талнахской Обогажительной фабрике ЗФ ПАО «ГМК “Норильский Никель”». Образцы представляли собой куски различной руды от 2 до 10 см (Рисунок 5). Для исследования было отобрано 85 образцов, в которые входили пустая, вкрапленная, густовкрапленная и массивная руды.



Рисунок 5 – Руда, использованная для проведения исследования

Для каждого образца были проведены три вида анализа. РСА с поверхности руды, с поверхности спила образца и истертой руды. Первый вид анализа был проведен 10 раз с поверхности пробы. Так как руда имеет неоднородную поверхность, анализ проводился с различных сторон образца, каждый из которых имеет размеры от 2 до 10 см. Несмотря на то, что для получения усредненного результата анализ проводится 10 раз, затраченное на РСА и расчеты время в несколько раз меньше времени, необходимого для проведения пробоподготовки измельченной руды. Вторым видом анализа

являлся анализ, проведенный 3 раза с поверхности спила каждого образца. Третий вид анализа был проведен 1 раз для каждой пробы, которую измельчили до 0,05 мм. Такой анализ считается наиболее точным, но ресурсно- и времязатратным, так как руда проходит несколько стадий подготовки к анализу: дробление, измельчение, просев, смешивание. Полученные данные представлены в Приложении .

РСА руды проводился на портативном XRF анализаторе DELTA для элементного анализа (Рисунок 6).



Рисунок 6 – XRF анализатор DELTA для элементного анализа

Анализатор оснащен миниатюрной рентгеновской трубкой 4Вт с анодом Ag, Rh, Au или Ta, кремниевым дрейфовым детектором (SDD), автоматической системой фильтров в сочетании с оптимизацией параметров рентгеновской трубки. Для экспресс анализа сплавов и горных пород от Mg и выше для Rh/Ag; от Al и выше для Ta/Au; почвы: от P и выше.

3 Результаты и их обсуждения

3.1 Корреляционный анализ данных

Для наглядной демонстрации факта существования взаимозависимости признаков был проведен корреляционный анализ: построены графики зависимостей процентного содержания серы, никеля, меди и железа (Рисунок 7 а–г), в пробах при различных видах анализа и подсчитан коэффициент корреляции.

Полученные значения уравнения и коэффициента корреляция представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Значения уравнений и коэффициентов корреляции для S, Ni, Cu и Fe

Компонент	Вид анализа	Уравнение	R
S	с поверхности пробы/в измельченной пробе	$Y=0,57215+1,0448*X$	0,97257
S	с поверхности пробы/со спила пробы	$Y=1,46871+0,93661*X$	0,93997
S	со спила пробы/в измельченной пробе	$Y=-0,36921+1,02012*X$	0,94648
Ni	с поверхности пробы/в измельченной пробе	$Y=0,04695+0,87794*X$	0,94777
Ni	с поверхности пробы/со спила пробы	$Y=0,09796+1,17282*X$	0,94667
Ni	со спила пробы/в измельченной пробе	$Y=-0,04871+0,76413*X$	0,94667
Cu	с поверхности пробы/в измельченной пробе	$Y=0,03660+1,25205*X$	0,96767
Cu	с поверхности пробы/со спила пробы	$Y=0,14642+1,01133*X$	0,95311
Cu	со спила пробы/в измельченной пробе	$Y=-0,02852+0,89825*X$	0,95311
Fe	с поверхности пробы/в измельченной пробе	$Y=0,21337+0,94130*X$	0,97978
Fe	с поверхности пробы/со спила пробы	$Y=1,20775+0,93334*X$	0,96292
Fe	со спила пробы/в измельченной пробе	$Y=-0,54059+0,96598*X$	0,97458

Полученные значения коэффициента корреляции находятся в промежутке от 0,94 до 0,98, что свидетельствует о прямой связи данных полученных при различных методах пробоподготовки руды. Корреляционное поле точек свидетельствует о преимущественно однородной выборочной совокупности. При этом на каждом графике имеется точка, значительно удаленная от основного поля, это указывает на различие видов руды. Так как данные значения дало исследование единственной пробы массивной руды, при дальнейшем расчете градуировочного уравнения для вкрапленных и пустых

руд, пробу массивной руды нужно исключить для уменьшения погрешности. Использование метода корреляционного анализа дает возможность обнаружить пробы с показателями, отличающимися от основной выборки, и применить фильтрацию данных для дальнейших расчетов.

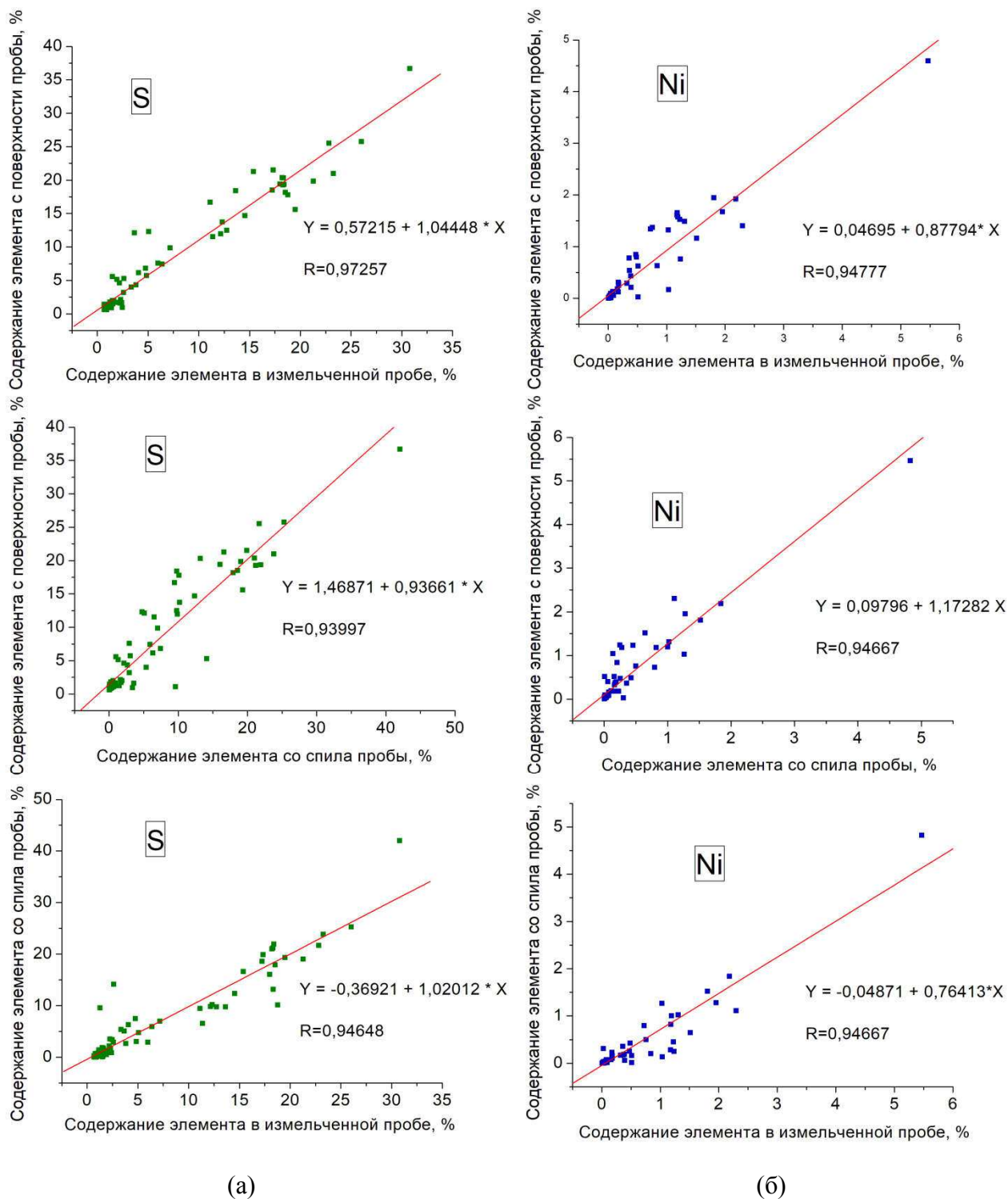


Рисунок 7 – Графики зависимостей процентного содержания элементов в пробах при различных видах анализа: (а) – серы, (б) – никеля, (в) – меди, (г) – железа

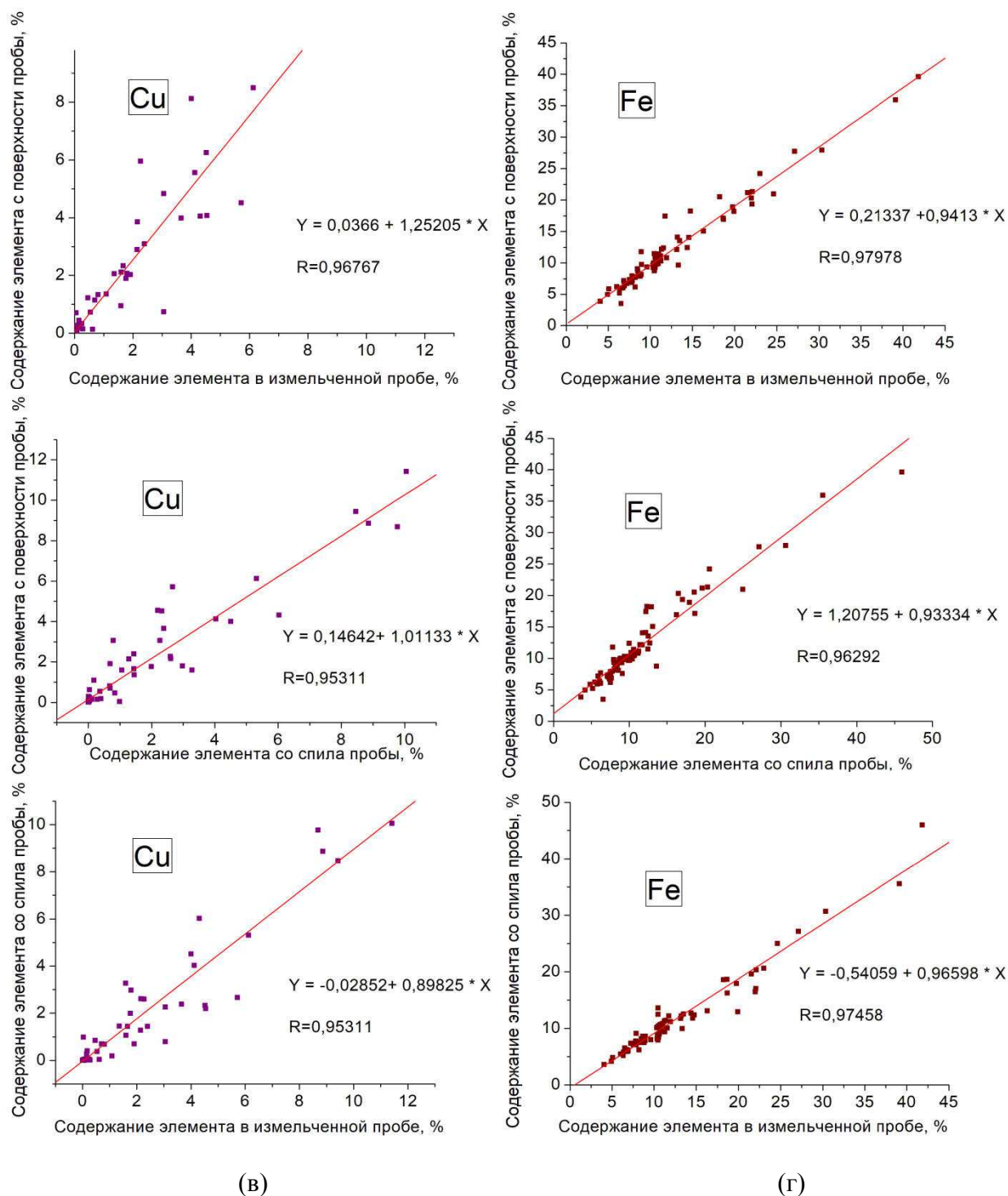
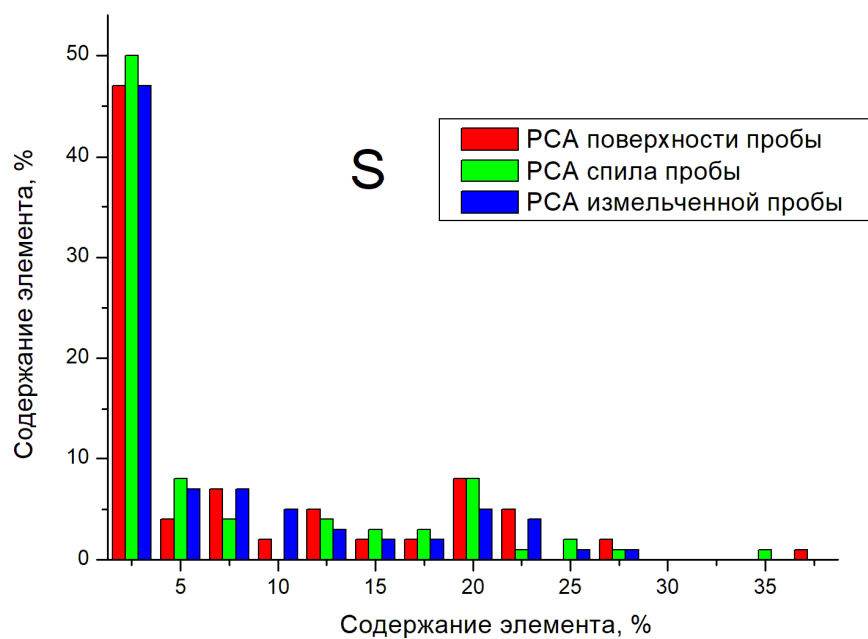


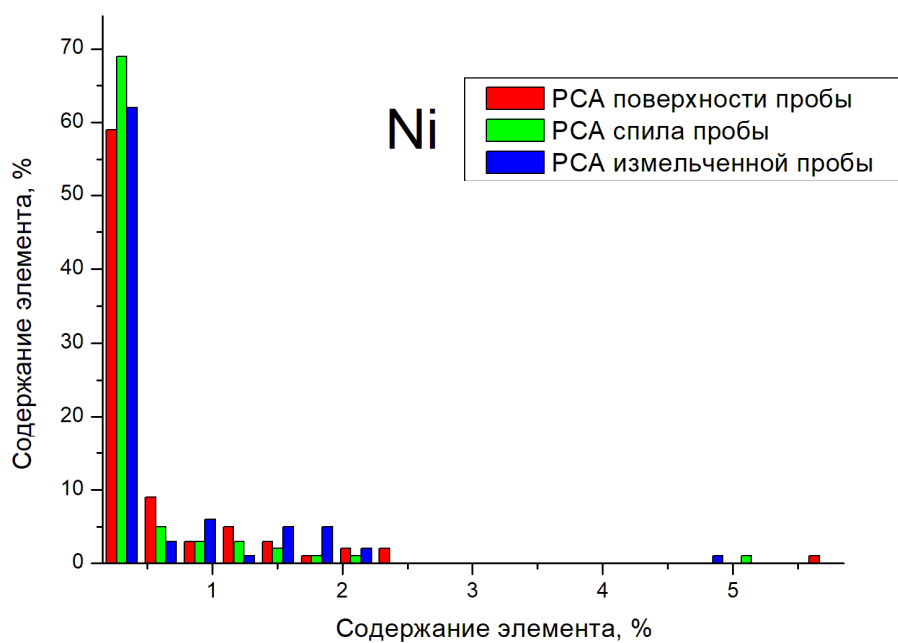
Рисунок 7, лист 2

3.2 Определение вида распределения данных

Для определения вида распределения были построены гистограммы (Рисунок 8 а–г), которые применяются для изображения интервального вариационного ряда.

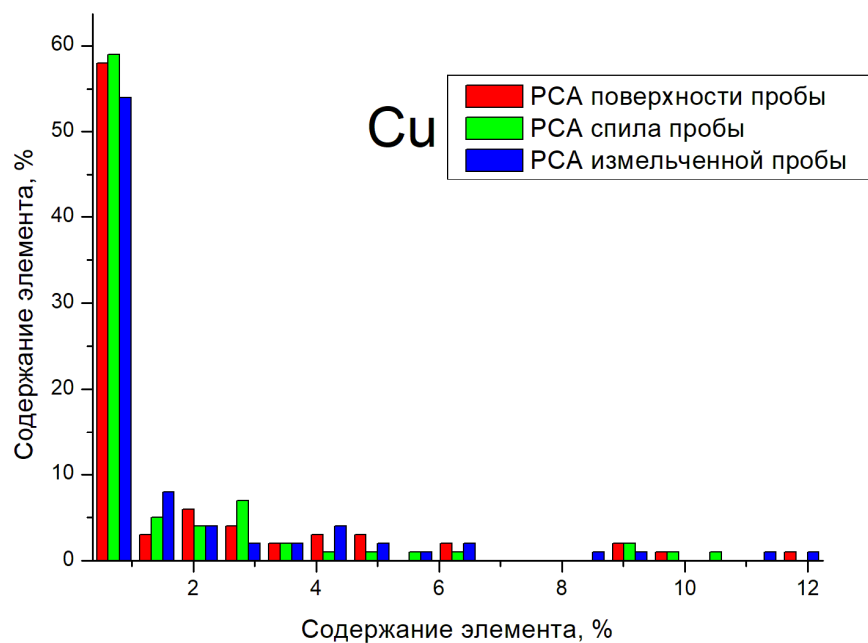


(а)

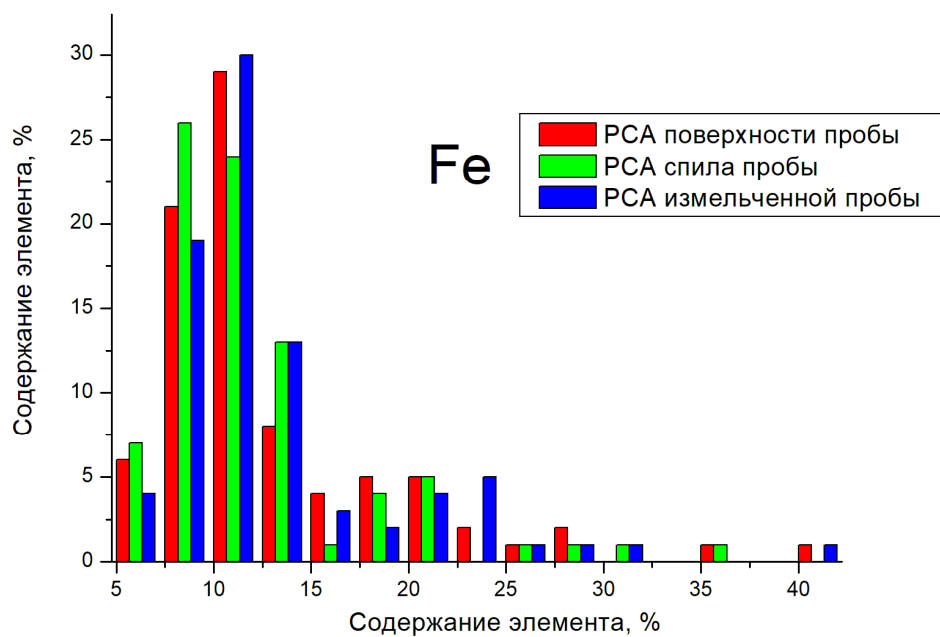


(б)

Рисунок 8 – гистограммы для содержания химических элементов в пробах: (а) – серы, (б) – никеля, (в) – меди, (г) – железа



(в)



(г)

Рисунок 8; лист 2

Виды полученных гистограмм свидетельствует о том, что распределение не является нормальным. Поэтому для исследования возможности

использования руды, не прошедшей измельчение, для мониторинга содержания компонентов серы, никеля, меди и железа на различных стадиях добычи и переработки руд методом рентгеноспектрального анализа должен использоваться непараметрический метод.

Для дальнейшего анализа был выбран метод Вилкоксона.

3.3 Анализ данных методом Вилкоксона

При проведении анализа с использованием критерия Вилкоксона была выдвинута гипотеза о неразличимости данных содержания компонентов серы, никеля, меди и железа в пробах при различных видах пробоподготовки. Если полученный эмпирический коэффициент окажется больше критического для исследуемого количества проб, гипотеза подтвердится.

Так как анализ проводился отдельно для каждого исследуемого компонента, выводы должны содержать информацию о подтверждении гипотезы для каждого из 4-х элементов индивидуально. Поэтому для исследования возможности использования руды, не прошедшей измельчение, для мониторинга содержания компонентов серы, никеля, меди и железа на различных стадиях добычи и переработки руд методом рентгеноспектрального анализа должен использоваться непараметрический метод.

Данные представленные в Таблице 2 показывают, что для серы, меди и железа $T_{кр} > T_{эмп}$, гипотеза о неразличимости данных содержания указанных выше компонентов в пробах при разных видах пробоподготовки не подтвердилась. Для данных по содержанию никеля $T_{кр} < T_{эмп}$ для анализа поверхности проб и измельченной руды, гипотеза на уровне значимости 0,95 о неразличимости данных содержания никеля в пробах при разных видах пробоподготовки подтвердилась.

Таблица 2 – Коэффициенты Вилкоксона для полученных данных по содержанию серы, никеля, меди и железа

Виды РСА	Т _{кр}	
	0.01	0.05
	397	466
	Т _{эмпер}	
Сера		
Поверхность пробы/измельченная проба	256	
Поверхность пробы/спил пробы	280	
Спил пробы/измельченная проба	145	
Никель		
Поверхность пробы/измельченная проба	610	
Поверхность пробы/спил пробы	41	
Спил пробы/измельченная проба	79	
Медь		
Поверхность пробы/измельченная проба	274	
Поверхность пробы/спил пробы	210	
Спил пробы/измельченная проба	69	
Железо		
Поверхность пробы/измельченная проба	250	
Поверхность пробы/спил пробы	284	
Спил пробы/измельченная проба	52	

3.4 Обсуждения результатов

Корреляционный анализ показал, что исследование вкрапленной, густовкрапленной и пустой руды возможно проводить на одном рентгеноспектрометре, так как форма корреляционного поля точек свидетельствует о схожести полученных результатов концентрации компонентов в руде. При этом, для руд, с отличным в несколько раз от указанных в Приложении содержанием, таких как массивные руды, нужно проводить отдельные расчеты.

Анализ Вилкоксона показателей содержания компонентов в руде наглядно продемонстрировал возможность использования проб, не прошедших измельчение, для мониторинга содержания компонентов никеля на различных стадиях добычи и переработки руд методом рентгеноспектрального анализа. При

этом для серы, меди и железа гипотеза о неразличимости данных содержания указанных выше компонентов в пробах при разных видах пробоподготовки не подтвердилась, из-за чего использование неизмельченной руды не даст достаточно точных результатов количественного спектрального анализа.

Данные результаты были получены по нескольким причинам: неравномерности распределения элементов в руде, межэлементного влияния и эффекта матрицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прежде чем приступить к разработке технологии инструментального контроля показателей качества непосредственно в транспортной системе нужно обосновать возможность использования для РФА неизмельченной руды. Для этого был проведен сбор данных о процентном содержании серы, никеля, меди и железа в руде, добытой на ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»». Для анализа были выбраны пробы массивной, густовкрапленной, вкрапленной и пустой руды.

Перед использованием Т-критерия Вилкоксона для выполнения цели магистерской диссертации были проведены классификация и обобщение полученных данных для трех видов пробоподготовки руды; а так же корреляционный анализ и определение вида распределения путем построения гистограмм для содержания компонентов в пробах.

Проведенное статистическое исследование показало, что экспресс анализ неизмельченной руды непосредственно в транспортной системе не может полностью заменить более точный анализ, требующий длительную пробоподготовку. Но он подходит для первичных результатов о концентрации компонентов.

Для получения более точных результатов при РСА неизмельченной руды требуется рассчитать градуировочные уравнения для каждого из ее видов поставляемых с определенного рудника, для чего потребуется введение стандартных образцов идентичных по содержанию искомым элементам в исследуемой руде. Для изготовления стандартных образцов могут использоваться результаты, полученные в данной работе. Так же в градуировочных уравнениях нужно учесть возможные аппаратные погрешности используемого РСА анализатора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Азарова С. В., Перегудина Е. В., Третьяков А. Н., Капустина А. А. Ценные и вредные элементы в рудах и отходах месторождений черной металлургии // Молодой ученый. — 2015. — №10. — С. 80-82. — URL <https://moluch.ru/archive/90/18984/>
2. Бахтиаров, А. В. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ в геологии и геохимии / А. В. Бахтиаров. — Л. : Недра, 1985. — 146 с.
3. Данные, предоставляемые корпоративным университетом ОАО «ГМК «Норильский Никель» студентам программы Профессиональный Старт.
4. Коэффициент корреляции [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://forex365.ru/indicators/koef-korrelyacii-v-excell.html>, свободный. — Загл. с экрана.
5. Критерий Т-Вилкоксона [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://webkonspect.com/?room=profile&id=13899&labelid=258274>, свободный. — Загл. с экрана.
6. Лабушев, М. М. Математические методы и модели при решении геологических задач на ЭВМ: Конспект лекций / М.М. Лабушев. — Красноярск: СФУ, 2007. — 149 с.
7. Орлов, А. И. Двухвыборочный Критерий Вилкоксона – анализ двух мифов / А. И. Орлов. // Научный журнал КубГАУ. — 2014. — №104(10). — С. 1-21.
8. Официальный сайт ОАО «ГМК «Норильский Никель» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.nornik.ru/kompaniya/o-kompanii/obshhie-svedeniya>, свободный. — Загл. с экрана.
9. Ранжирование данных [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://help.prognoz.com/ru/mergedProjects/UiAnalyticalArea/analysis/ranking_data.htm, свободный. — Загл. с экрана.
10. Сидоренко Е., Методы математической обработки / Е. Сидоренко. — М. : Речь, 2007. — 350 с.

11. Харькова, А. Сравнение двух несвязанных выборок с использованием пакета статистических программ STATA: непараметрические критерии / А. Харькова, М. Гржибовский // Экология человека. – 2014. – № 4. – С. 60-64.
12. Черноруков, Н. Г. Теория и практика рентгенофлуоресцентного анализа / Н. Г. Черноруков, О. В. Нипрук. – Нижний Новгород : Национальный исследовательский университет, 2012. – 57 с.
13. Ширкин, Л.А. Рентгенофлуоресцентный анализ объектов окружающей среды Учебное пособие / Л.А. Ширкин. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 65 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Данные по процентному содержанию серы, никеля, меди и железа в исследованных пробах руды

ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»»

№	S, пов	S, изм	S, спил	Fe, пов	Fe, изм	Fe, спил	Cu, пов	Cu, изм	Cu, спил	Ni, пов	Ni, изм	Ni, спил
	Среднее содержание, %			Среднее содержание, %			Среднее содержание, %			Среднее содержание, %		
1	0,89011059	0,801294	0,2371	10,9039	10,58753	10,2483	0,0256	0,029923	0,0129	0,0263	0,0139	0,0088
2	0,67518456	0,676207	0,0541	6,3566	6,924436	6,0797	0,0121	0,021612	0,0025	0,0171	0,0109	0,0046
3	20,9678635	23,26204	23,8205	21,3298	22,12372	20,3232	8,8629	11,1103	8,8596	1,1941	1,5725	1,0022
4	25,7562414	26,0249	25,2788	21,1567	21,55197	19,6130	11,4174	13,55507	10,0521	2,2994	1,3998	1,1076
5	1,20506983	1,224384	0,9656	10,2944	10,75132	10,0587	0,0796	0,12776	0,0508	0,0359	0,0567	0,0238
6	4,3228318	3,811779	2,6414	9,9210	10,64005	9,0007	0,8050	1,330008	0,6793	0,1581	0,1821	0,0760
7	19,3962804	17,99765	16,0552	9,6484	13,32275	9,9296	2,2697	5,955893	2,6016	0,1772	0,31	0,1330
8	5,11752479	1,919409	1,3121	7,9419	7,840276	7,7517	0,0637	0,037491	0,0058	0,0482	0,0279	0,0108
9	1,22001016	0,985018	0,7357	9,2439	10,35351	8,1635	0,0262	0,048777	0,0105	0,0289	0,0211	0,0043
10	1,52717063	1,297114	0,3938	10,1059	10,71425	10,1433	0,0474	0,090199	0,0081	0,0406	0,0325	0,0102
11	1,74545581	1,243297	0,5883	3,8420	4,029489	3,5978	0,0236	0,020976	0,0050	0,0224	0,0126	0,0047
12	3,17986685	2,580552	2,9415	6,0879	6,777543	6,2253	0,0491	0,093132	0,0155	0,0454	0,0396	0,0240
13	21,2614273	15,39894	16,5958	27,7657	27,11662	27,0998	2,1460	2,893878	1,2817	1,9550	1,6724	1,2771
14	2,14486518	2,301461	1,6597	9,3492	9,615088	7,9596	0,2503	0,326762	0,0488	0,0803	0,1104	0,0318
15	5,56607079	1,485511	1,0000	11,7938	8,942427	7,7902	0,6236	0,129654	0,0368	0,5145	0,0283	0,0097
16	1,39607392	1,047598	0,2100	9,7875	10,82727	9,4234	0,0390	0,026544	0,0079	0,0315	0,0116	0,0056
17	0,98471812	1,149902	0,4447	10,2761	10,90831	9,4406	0,0262	0,049365	0,0106	0,0297	0,0152	0,0090
18	1,23601662	1,139313	1,4367	8,0746	8,687879	8,5962	0,0371	0,02676	0,0128	0,0268	0,0092	0,0077

Продолжение приложения

19	1,0278085	0,785083	0,0673	7,5842	7,850528	7,5620	0,0250	0,021931	0,0037	0,0282	0,0123	0,0035
20	18,4864168	17,25326	18,5898	9,7834	10,4838	7,9256	0,7014	1,143675	0,6949	0,1842	0,2501	0,1075
21	3,99907339	3,333265	5,3550	11,4447	11,0024	10,6014	1,3619	2,059069	1,4544	0,3249	0,289	0,1663
22	1,97732311	1,482591	1,8727	8,7335	8,53954	8,1302	0,1786	0,188002	0,4032	0,0462	0,0341	0,0278
23	1,63615622	2,39639	0,8706	9,2643	10,55984	8,4948	0,1085	0,269387	0,0293	0,0478	0,0927	0,0102
24	6,81165379	4,760848	7,4580	10,4896	11,02962	10,7072	0,1541	0,439559	0,2765	0,0840	0,13	0,0717
25	19,8301927	21,27423	19,0137	16,9528	18,68634	16,2407	9,4324	13,22373	8,4636	0,7555	1,3747	0,5002
26	1,32619901	0,693367	0,0744	6,2027	5,99364	5,4588	0,0430	0,015327	0,0036	0,0300	0,013	0,0039
27	17,796036	18,77935	10,1271	18,1717	19,93475	12,9316	3,0557	4,832583	2,2621	1,1764	1,6128	0,2803
28	6,15343193	4,067064	6,3189	9,7627	8,986514	8,6195	0,0615	0,020236	0,0040	0,0459	0,0097	0,0048
29	1,50289076	1,473828	0,4626	8,3091	8,582127	8,0067	0,0524	0,154839	0,0244	0,0386	0,0317	0,0151
30	0,92960098	0,748572	0,0367	8,1268	8,952554	8,2163	0,0154	0,015327	0,0053	0,0189	0,0127	0,0055
31	7,55270471	5,972578	2,9108	12,4050	11,56476	10,0318	1,9128	2,0287	0,6940	0,3963	0,2094	0,0604
32	25,5309169	22,82741	21,7069	17,1476	18,63166	18,6500	8,6855	11,48839	9,7716	0,7277	1,3385	0,7950
33	1,40105404	0,686284	0,2805	9,0540	8,49688	8,1227	0,0398	0,028828	0,0059	0,0391	0,0161	0,0098
34	1,69214232	1,89115	0,5071	9,9017	10,41223	10,2032	0,0878	0,255504	0,0144	0,0358	0,0345	0,0098
35	0,98689418	0,893229	0,2581	9,6919	10,34194	10,1043	0,0221	0,026436	0,0088	0,0306	0,0275	0,0197
36	0,98197506	0,899655	0,2849	10,7814	11,01517	10,8135	0,0392	0,038283	0,0178	0,0397	0,0244	0,0183
37	1,09441203	1,100539	0,5933	8,1158	8,629175	8,0874	0,0287	0,025248	0,0051	0,0293	0,015	0,0103
38	1,54177506	1,234899	0,8950	8,8307	10,53221	8,3631	0,0366	0,032237	0,0102	0,0272	0,025	0,0079
39	1,10954222	0,839776	0,4581	11,1113	11,21439	11,2592	0,0369	0,05399	0,0216	0,0764	0,0756	0,0643
40	1,09437552	1,288133	9,6013	8,7497	10,49707	13,6071	0,0395	0,116136	0,9886	0,0298	0,0566	0,3065
41	0,97515952	0,863947	0,0348	7,0452	7,545057	7,2019	0,0183	0,035916	0,0036	0,0200	0,01	0,0042
42	1,80134698	1,578469	0,2426	7,6861	8,22719	6,1986	0,0637	0,70689	0,0040	0,0312	0,0117	0,0019
43	0,7241458	0,787493	0,0382	7,7707	8,014499	7,5174	0,0122	0,013885	0,0032	0,0159	0,0113	0,0038
44	12,305696	5,071557	4,7538	5,9385	6,39077	5,7794	0,1545	0,255179	0,1083	0,0653	0,0951	0,0419

Продолжение приложения

45	1,00269618	1,102291	0,4545	9,3022	10,57682	9,0673	0,0206	0,053632	0,0119	0,0213	0,0217	0,0140
46	5,724193	4,847014	3,0542	14,0981	13,23117	12,1715	0,5425	0,724806	0,3721	0,3890	0,4352	0,1890
47	1,24204825	0,858616	0,2897	10,4237	10,75313	10,6563	0,0310	0,03817	0,0142	0,0241	0,0179	0,0075
48	14,6749369	14,54611	12,3767	12,4109	14,40429	12,7096	4,0071	8,125615	4,5067	0,4843	0,7946	0,4249
49	20,3054648	18,32778	13,1900	20,3258	22,00552	16,4736	4,5432	4,078684	2,1982	1,2276	1,5288	0,4536
50	16,7040989	11,11137	9,4489	18,2474	14,76401	12,3558	3,6557	3,988012	2,3833	0,8382	0,6324	0,2045
51	11,9496326	12,16172	9,8561	15,0577	16,30025	13,0906	1,0871	1,351265	0,1812	0,4749	0,847	0,2565
52	18,4203901	13,64195	9,7693	20,4961	18,23895	18,5883	2,3983	3,095829	1,4409	1,2375	0,7598	0,2507
53	0,60078958	0,92879	0,0702	7,8818	8,827283	7,4974	0,0112	0,022889	0,0030	0,0141	0,0077	0,0017
54	7,41268469	6,384569	5,9291	10,8021	11,94268	11,2034	0,4658	1,22144	0,8415	0,1816	0,2827	0,1625
55	1,60133195	2,253267	3,5537	6,1614	8,20439	7,4853	0,0122	0,01184	0,0047	0,0066	0,003	0,0017
56	18,1731663	18,5283	17,9237	19,3399	22,08023	17,0302	1,6019	2,111997	1,0662	1,1794	1,6559	0,8214
57	1,58395267	1,309163	0,6049	9,9079	10,95476	10,3175	0,0330	0,041013	0,0093	0,0267	0,0199	0,0035
58	9,84110275	7,160211	7,0109	4,9727	4,906645	4,1667	0,0402	0,050544	0,0025	0,0438	0,0389	0,0059
59	1,69992648	1,630899	1,7265	5,2123	6,324576	5,1474	0,0158	0,02225	0,0030	0,0119	0,0134	0,0027
60	36,6950212	30,79858	42,0205	39,6163	41,84141	45,9623	4,3070	4,047665	6,0253	5,4649	4,5926	4,8250
61	1,05849904	0,902722	0,0552	7,6054	7,886663	9,0956	0,0227	0,123131	0,0042	0,0224	0,0089	0,0032
62	0,90671584	1,411978	0,3366	9,9390	10,73753	10,1640	0,0217	0,063328	0,0217	0,0206	0,0298	0,0067
63	1,0241574	0,88045	0,0856	7,2018	6,879097	5,8773	0,0930	0,108139	0,0235	0,0399	0,0242	0,0120
64	19,3714966	18,40453	21,9235	20,9781	24,6498	24,9801	5,7108	4,510243	2,6659	1,0277	1,3236	1,2626
65	15,5822812	19,50563	19,3299	18,8913	19,78509	17,9394	4,1264	5,555787	4,0305	1,3090	1,487	1,0232
66	0,96037253	2,464009	3,4096	3,5072	6,512038	6,5385	0,0121	0,023744	0,0151	0,0059	0,0065	0,0019
67	1,00104588	1,013423	0,2265	9,8886	10,53857	10,4425	0,0316	0,068413	0,0099	0,0181	0,0156	0,0027
68	0,78950795	0,897829	0,2193	7,1854	7,878719	7,0948	0,0155	0,033124	0,0081	0,0142	0,0087	0,0026
69	1,09879336	0,804799	0,6881	10,0165	10,41908	8,7932	0,0166	0,024066	0,0082	0,0181	0,0102	0,0024
70	19,2576039	18,31683	21,1989	35,9379	39,11943	35,5250	1,7630	1,889764	1,9981	2,1852	1,9187	1,8411

Окончание приложения

71	1,9749937	1,615564	0,5910	12,1856	11,3275	11,4134	0,2848	0,149636	0,0123	0,0923	0,0538	0,0135
72	0,61964121	0,733091	0,0399	6,8608	7,792245	7,6123	0,0090	0,012248	0,0029	0,0133	0,0091	0,0017
73	0,62100887	0,780994	0,0348	7,3374	7,546798	7,0665	0,0054	0,028064	0,0022	0,0134	0,0139	0,0041
74	20,3662485	18,22906	21,0152	27,9342	30,36704	30,6343	1,6631	2,330216	1,4390	1,8073	1,948	1,5214
75	11,5355457	11,37651	6,5403	14,0587	14,59038	11,7750	4,5176	6,258493	2,3263	0,5122	0,6224	0,1578
76	21,492411	17,35089	19,8884	24,2106	23,02308	20,5989	1,7944	2,075012	2,9750	1,5162	1,1619	0,6450
77	1,53377183	1,302153	0,9704	6,0134	6,637429	6,1578	0,0239	0,012248	0,0050	0,0309	0,0271	0,0289
78	5,28571676	2,62714	14,1219	11,4809	10,47514	12,4793	1,5966	0,945737	3,2761	0,1785	0,1235	0,2282
79	12,1069223	3,663471	5,0888	17,4146	11,76646	12,2142	3,0553	0,737388	0,7873	1,0376	0,1646	0,1371
80	1,38092912	1,030948	0,4919	10,1224	10,67289	9,9245	0,0290	0,021612	0,0058	0,0321	0,0328	0,0071
81	4,63215372	2,19076	2,1411	5,8827	5,043876	4,8255	0,0797	0,047371	0,0162	0,0515	0,0188	0,0081
82	13,7189014	12,32229	10,2026	13,5387	13,47422	12,5372	6,1220	8,502619	5,3128	0,3684	0,5388	0,1723
83	1,44419553	1,538599	0,0902	10,3205	11,26139	9,3746	0,0313	0,020342	0,0034	0,0340	0,0076	0,0341
84	1,14660828	0,817578	0,1032	6,7345	7,243961	7,3583	0,0115	0,012963	0,0024	0,0207	0,0128	0,0080
85	12,468236	12,74918	9,7909	12,1327	13,13401	11,7172	2,1546	3,852439	2,6068	0,3600	0,7814	0,3536

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Базовая кафедра фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ

Зав. баз. кафедрой ФилТ

А.Н. Втюрин

« » 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Мониторинг содержания компонентов на различных стадиях добычи и
переработки руд (S, Ni, Cu, Fe)

16.04.01 «Техническая физика»

16.04.01.02 «Оптическая физика и квантовая электроника»

Научный руководитель

Слюсарев
Шереметьева
Салмин

профессор,
д-р физ.-мат.наук

Е.А. Слюсарева

Выпускник

Ю.А. Шереметьева

Рецензент

профессор,
д-р физ.-мат.наук

В.В. Салмин

Красноярск 2018